Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

DOĞRULTU ATIMLI FAYLANMADA BORU HATLARI LASTİK AGREGA DOLGUSUNUN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF TYRE-DERIVED AGGREGATE BACKFILL FOR PIPELINES UNDER STRIKE-SLIP FAULT CONDITIONS

Mustafa KARAMAN[1], Hasan Emre DEMİRCİ[2], Nurhan ECEMİŞ[3], Subhamoy BHATTACHARYA[4]

ÖZET

Aktif fayları kesen gömülü sürekli boru hatları, kalıcı zemin deformasyonları nedeniyle önemli eksenel ve eğilme şekil değiştirmelerine maruz kalabilmektedir. Bu çalışmada, hurda lastik agregasının (HLA) doğrultu atımlı fayları kesen gömülü boru hatlarında hasar azaltıcı dolgu malzemesi olarak kullanımının etkinliği fiziksel model deneyleriyle araştırılmıştır. Bu amaçla, HLA oranı ile dolgu hendeğinin geometrisi ve boyutlarının değiştirildiği beş farklı deney gerçekleştirilmiştir. HDPE model borular fay izini 90° açıyla kesmekte olup, normalize fay yer değiştirmesi δ/D=6,0 değerine kadar uygulanmıştır. Sonuçlar, HLA oranının yanı sıra hendek geometrisi ve boyutlarının da boruda gelişen eksenel ve eğilme şekil değiştirmelerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. En yüksek hasar azaltma performansı %100 HLA dolgulu üçgen hendek konfigürasyonunda elde edilmiş; δ/D=5,0 değerinde referans deneye göre en büyük eksenel ve eğilme şekil değiştirmeleri sırasıyla %62 ve %19 oranında azalmıştır. Bulgular, uygun hendek geometrisiyle HLA dolgusunun zemin–boru etkileşimini azaltmada etkili bir yöntem olabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Gömülü boru hatları, fay, hurda lastik agregası (HLA), zemin–boru etkileşimi, fiziksel model deney*

ABSTRACT

Buried continuous pipelines crossing active faults may experience significant axial and bending strains due to permanent ground deformation. This study experimentally investigates the effectiveness of Tyre Derived Aggregate (HLA) as a mitigation backfill for buried pipelines crossing strike-slip faults. Five physical model tests were conducted by varying the HLA content and the geometry and dimensions of the backfill trench. HDPE model pipes crossed the fault trace at an angle of 90°, and normalized fault displacements up to δ/D=6.0 were applied. The results demonstrate that HLA content, trench geometry, and trench dimensions significantly influence the axial and bending response of the pipeline. The highest mitigation performance was obtained with the triangular trench configuration containing 100% HLA. At δ/D=5.0, the maximum axial and bending strains were reduced by 62% and 19%, respectively, compared to reference test. These findings indicate that HLA backfill with an appropriate trench geometry can effectively reduce soil–pipe interaction.

Keywords: *Buried pipelines, fault, Tyre Derived Aggregate (HLA), soil–pipe interaction, physical model test*

[1] Doktor Öğr. Üyesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, mustafa.karaman@eskisehir.edu.tr, (Sorumlu yazar)
[2] Doktor Öğr. Üyesi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, hasanemre.demirci@ikc.edu.tr
[3] Profesör, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, nurhanecemis@iyte.edu.tr
[4] Profesör, Surrey Üniversitesi, İngiltere, s.bhattacharya@surrey.ac.uk

1. GİRİŞ

Boru hatları; su, doğal gaz, petrol, atık su ve diğer akışkanların uzun mesafeler boyunca güvenli ve ekonomik biçimde taşınmasında kullanılan kritik altyapı sistemleridir. Enerji, sanayi ve kentsel hizmetlerin sürekliliği büyük ölçüde bu sistemlerin işlevselliğine bağlı olduğundan, boru hatlarının deprem gibi doğal tehlikeler altında performanslarının korunması büyük önem taşımaktadır. Jeolojik ve sismik açıdan tehlikeli bölgelerde boru hatlarının yer üstünde tesis edilmesi mümkün olmakla birlikte, çevresel koşullar, güvenlik, arazi kullanımı ve işletme gereksinimleri nedeniyle çoğunlukla yer altına gömülü olarak inşa edilmektedir.

Depremler sırasında gömülü boru hatlarında meydana gelen hasarlar genel olarak geçici zemin deformasyonları ve kalıcı zemin deformasyonları (KZD) ile ilişkilidir. Geçici zemin deformasyonları sismik dalgaların yayılımı sırasında ortaya çıkarken, KZD; yüzey faylanması, sıvılaşmaya bağlı yanal yayılma, heyelan ve kalıcı oturma gibi mekanizmalar sonucunda gelişebilmektedir. Özellikle aktif fayları kesen gömülü boru hatları, fayın iki tarafında meydana gelen göreli zemin hareketleri nedeniyle önemli eksenel ve eğilme deformasyonlarına maruz kalabilmektedir. Boru hattında gelişen bu deformasyonların sınırlandırılması, sistemin deprem sonrasında işlevselliğini sürdürebilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Fay geçişlerinde gömülü boru hatlarının performansını iyileştirmek amacıyla çeşitli sismik hasar azaltma yöntemleri geliştirilmiştir. Boru gömülme derinliğinin azaltılması, et kalınlığı veya malzeme dayanımının artırılması, boru çevresindeki doğal zeminin daha uygun malzemelerle değiştirilmesi ve boru–zemin etkileşimini sınırlandıran koruyucu sistemlerin kullanılması bu yöntemler arasındadır. Bu yaklaşımların temel amacı, kalıcı zemin deformasyonlarının boruya aktarılmasını azaltarak aşırı eksenel şekil değiştirme, eğilme ve yerel burkulma gibi hasar mekanizmalarını sınırlandırmaktır.

Son yıllarda bu yöntemlere alternatif olarak, hurda lastiklerden elde edilen agrega (hurda Lastik Agregaları, HLA) malzemelerinin boru çevresinde dolgu olarak kullanılması gündeme gelmiştir. HLA'nın düşük birim hacim ağırlığı, yüksek sıkışabilirliği ve esnek mekanik davranışı, zemin–yapı etkileşiminin ve gömülü yapılara aktarılan zemin basınçlarının azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir. Ayrıca kullanım ömrünü tamamlamış lastiklerin yeniden değerlendirilmesine olanak sağlaması, HLA'yı çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli bir alternatif haline getirmektedir.

HLA'nın gömülü boru hatlarında kullanımını ele alan sınırlı sayıdaki çalışma, malzemenin hasar azaltma potansiyeline işaret etmektedir. Sim vd. (2012), düşey fay hareketine maruz boru hatlarında HLA dolgu hendeğinin eğilme momentlerini azaltabildiğini deneysel olarak göstermiştir. Ni vd. (2018a, b, c) ise sayısal çalışmalarında HLA kullanımının borular üzerindeki zemin yüklerini ve şekil değiştirmeleri azaltabildiğini; HLA bölgesinin geometrisi, boyutları, konumu ve zemin–HLA göreli rijitliğinin sistem davranışında etkili olduğunu ortaya koymuştur. Doğrultu atımlı faylar için yapılan analizler de uygun tasarlanmış HLA dolguların geleneksel hasar azaltma yöntemlerine etkili bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

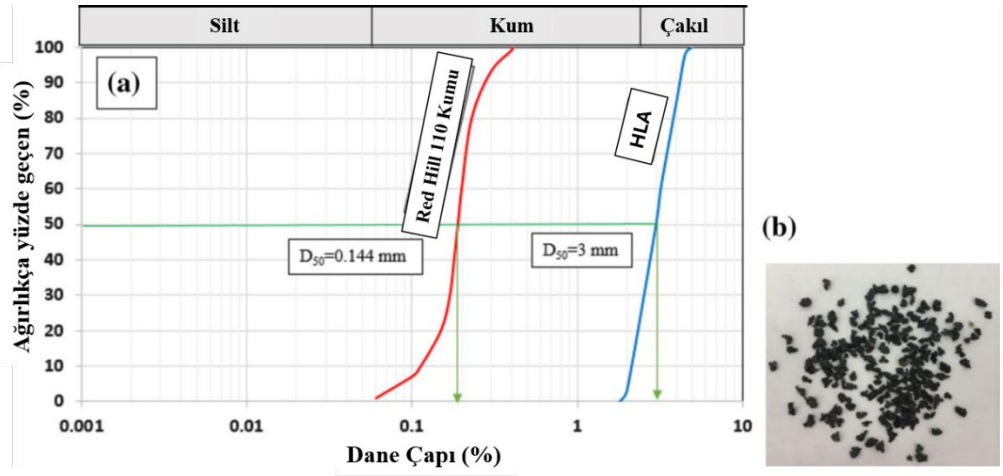
Bununla birlikte, HLA'nın aktif fayları kesen sürekli gömülü boru hatlarında kullanımına ilişkin deneysel çalışmalar oldukça sınırlıdır. Özellikle doğrultu atımlı faylanma altında

HLA oranı ile dolgu hendeğinin geometrisi ve boyutlarının boru davranışına etkisinin sistematik olarak araştırılmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu çalışmada, doğrultu atımlı fay hareketine maruz sürekli gömülü boru hatlarının davranışı ve HLA kullanımının hasar azaltma performansı fiziksel model deneyleriyle incelenmiştir. Farklı HLA dolgu konfigürasyonları kullanılarak HLA oranının, hendek geometrisinin ve boyutlarının boru hattında gelişen deformasyonlar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Böylece aktif fay geçişlerinde HLA kullanımının etkinliği ve uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Malzemeler

Deneysel çalışmada zemin malzemesi olarak Red Hill 110 kumu, boru çevresinde oluşturulan hasar azaltıcı dolgu bölgelerinde ise ortalama dane çapı 3 mm olan hurda lastik agregası (HLA) kullanılmıştır. Red Hill 110 kumu ve HLA'nın dane boyu dağılımları Şekil 1a'da, deneylerde kullanılan HLA danelerinin görünümü ise Şekil 1b'de verilmiştir. Red Hill 110 kumunun ortalama dane çapı (D_{50}) 0,144 mm olup, %35 rölatif sıkılıkta (D_r) kuru birim hacim ağırlığı (γ_{sand}) 13 kN/m³'tür. HLA'nın ortalama dane çapı (D_{50}) 3 mm, birim hacim ağırlığı (γ_{HLA}) ise 4,73 kN/m³ olarak belirlenmiştir. Red Hill 110 kumunun özgül ağırlığı ile en küçük ve en büyük boşluk oranları ilgili standartlara uygun olarak gerçekleştirilen deneylerle belirlenmiştir (ASTM D4254-00, 2000; ASTM D4253-00, 2000). Buna göre kumun en büyük boşluk oranı e_{max} = 1,035, en küçük boşluk oranı emin = 0,608 ve özgül ağırlığı G_s = 2,65 olarak elde edilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. (a) Red Hill 110 kumu ve hurda lastik agregasının (HLA) dane boyu dağılımları, (b) deneylerde kullanılan HLA daneleri.

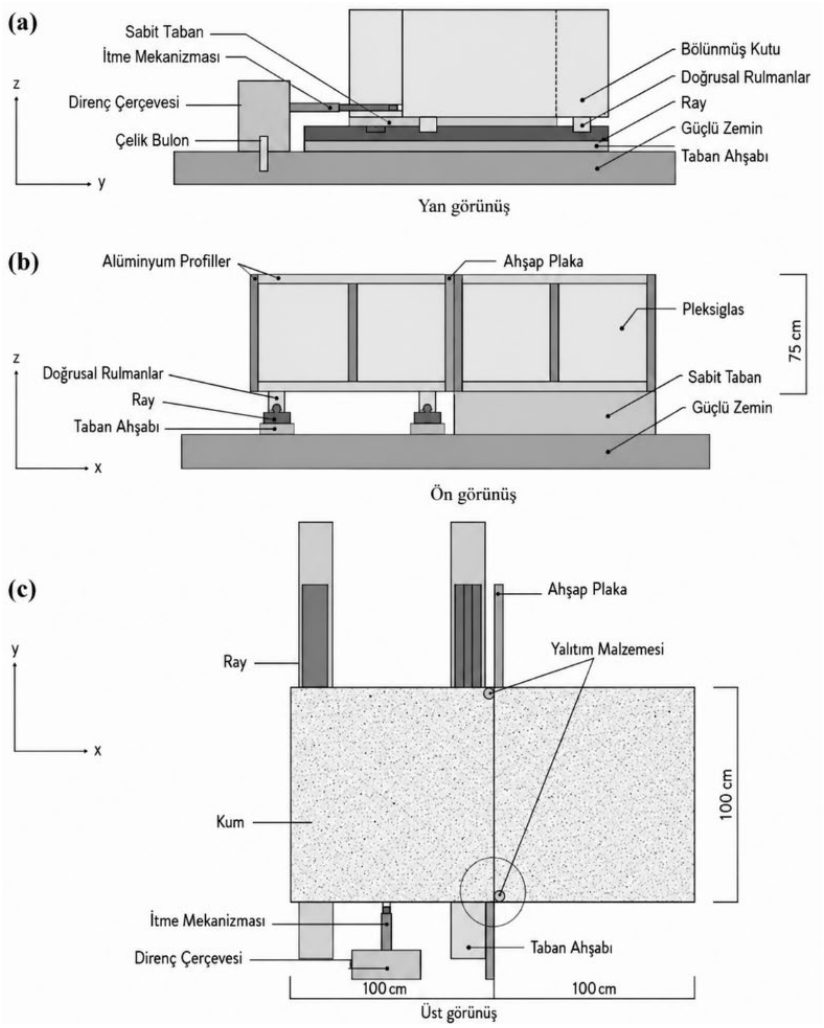
Deney kutusundaki kum dolgunun hazırlanmasında kuru yağmurlama yöntemi kullanılmış ve tüm deneylerde 200 mm'lik sabit düşme yüksekliği uygulanmıştır. Dolgunun farklı konum ve derinliklerine yerleştirilen altı adet küçük metal kap yardımıyla deneyler sırasında elde edilen kuru birim hacim ağırlıklar kontrol edilmiştir. Bu ölçümler sonucunda deneylerde oluşturulan Red Hill 110 kumunun ortalama rölatif sıkılığı (D_r) %35 olarak belirlenmiştir. Kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri ve rölatif sıkılığın belirlenmesine ilişkin ayrıntılar Demirci (2020) ve Karaman vd. (2022)'de verilmiştir.

2.2. Fiziksel Model Deney Düzeneği

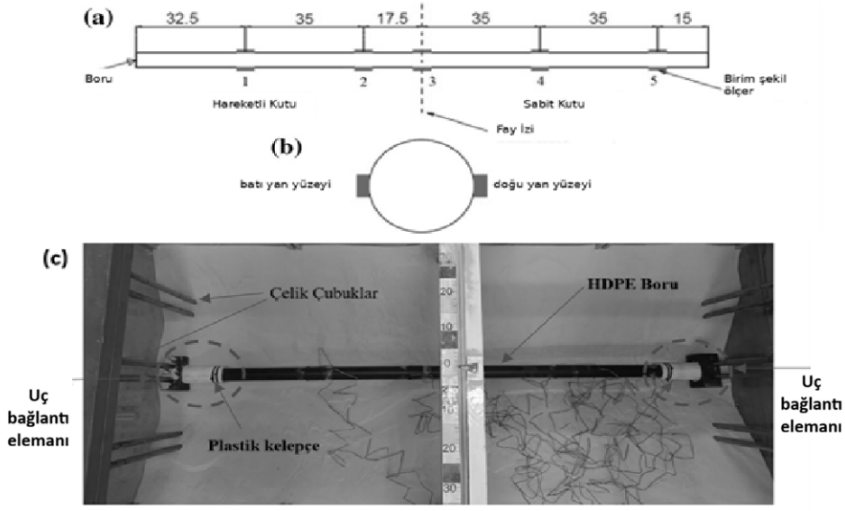
Aktif fayları kesen gömülü boru hatlarının davranışının araştırılmasında fiziksel model deneyleri önemli bir yöntemdir. Bununla birlikte, zeminlerin doğrusal olmayan davranışı ve model ile gerçek ölçek arasındaki gerilme düzeyi farklılıkları, fiziksel modellemede dikkate alınması gereken temel konular arasında yer almaktadır. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği, Bhattacharya vd. (2021) tarafından önerilen boyut analizi yaklaşımı esas alınarak tasarlanmıştır. Bu yaklaşımda probleme ilişkin temel denklemlerden ve Buckingham Pi teoreminden yararlanılarak boyutsuz gruplar belirlenmekte ve model-prototip benzerliği değerlendirilmektedir. Deney düzeneğinin tasarımında kullanılan boyutsuz gruplar ve ölçekleme ilişkilerine ilişkin ayrıntılar Demirci (2020) ve Demirci vd. (2021)'de sunulmuştur. Doğrultu atımlı fay hareketini fiziksel olarak benzeştirmek amacıyla geliştirilen deney düzeneği, biri sabit diğeri hareketli olmak üzere iki kutudan oluşmaktadır. Deney düzeneğinin yan, ön ve plan görünüşleri Şekil 2'de verilmiştir. Düzeneğin toplam dış boyutları 100 cm genişlik, 200 cm uzunluk ve 75 cm yükseklik; iç boyutları ise sırasıyla 95 cm, 195 cm ve 70 cm'dir. Hareketli kutunun düşük sürtünmeyle ve kontrollü biçimde hareket etmesini sağlamak amacıyla ray ve doğrusal yatak sistemleri kullanılmıştır. Hareketli kutuya yatay doğrultuda en fazla 30 cm yer değiştirme uygulayabilen elektrikli bir doğrusal hareketlendirici yerleştirilmiştir. Hareketlendirici ile hareketli kutu arasına yerleştirilen S tipi yük hücresi yardımıyla hareket sırasında uygulanan kuvvet ölçülmüştür. Şekil 2a'da düzeneğin yan görünüşü ile itme mekanizması, direnç çerçevesi, ray sistemi ve sabit tabanın konumları; Şekil 2b'de ise ön görünüş ile hareketli ve sabit kutuların taşıyıcı sistem üzerindeki yerleşimleri gösterilmektedir. Şekil 2c'de verilen plan görünüşünde iki kutu arasındaki sınır, hareket doğrultusu ve kutuların göreli konumları görülmektedir. Sabit ve hareketli kutuların birleşim bölgesinden kum kaybını önlemek amacıyla ahşap plakalar ve 4 cm dış çapa sahip boru yalıtım köpükleri kullanılmıştır. Model boru olarak 170 cm uzunluğunda, 5 cm dış çapında ve 0,3 cm et kalınlığında yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) boru kullanılmıştır.

Model borunun doğrultu atımlı fay hareketi sırasında geliştirdiği boyuna şekil değiştirmelerin belirlenmesi amacıyla borunun iki yan yüzeyine karşılıklı birim şekil değiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Ölçerlerin boru boyunca ve boru kesitindeki yerleşimleri Şekil 3'de gösterilmektedir. Şekil 3a'da birim şekil değiştirme ölçüm noktalarının boru boyunca fay izine göre konumları görülmektedir. Ölçüm noktaları, özellikle fay yakınında meydana gelmesi beklenen yüksek şekil değiştirmelerin belirlenebilmesine olanak sağlayacak şekilde düzenlenmiştir. Şekil 3b'de ise her bir ölçüm kesitinde borunun karşılıklı iki yan yüzeyine yerleştirilen ölçerlerin konumları gösterilmektedir. Sarvanis ve Karamanos (2017) tarafından önerilen analitik yönteme göre boruda oluşması beklenen en büyük çekme ve basınç şekil değiştirmelerinin yaklaşık %3 düzeyinde olması nedeniyle kullanılan ölçerlerin çalışma aralığı −%3 ile +%3 olarak seçilmiştir. Karşılıklı ölçerlerden elde edilen boyuna şekil değiştirme değerleri kullanılarak borudaki eğilme ve eksenel şekil değiştirmeler hesaplanmıştır. Borunun karşılıklı iki yan yüzeyinde ölçülen boyuna şekil değiştirmelerin farkının yarısı eğilme şekil değiştirmesi (ε_b), ortalaması ise eksenel şekil değiştirme (ε_a) olarak tanımlanmıştır.

Model borunun her iki ucunda, gerçek boru hatlarının deney düzeneği sınırları dışında devam eden bölümlerinin etkisini temsil etmek amacıyla özel uç bağlantı elemanları kullanılmıştır. Uç bağlantı elemanlarının deney kutusu içerisindeki yerleşimleri Şekil 3c'de verilmiştir.



Şekil 2. Doğrultu atımlı fay deneylerinde kullanılan fiziksel model deney düzeneği: (a) yan görünüş, (b) ön görünüş ve (c) plan görünüşü.



Şekil 3. Model boru üzerindeki birim şekil değiştirme ölçerlerin yerleşimi: (a) boru boyunca ölçüm noktalarının ve fay izinin konumu, (b) boru kesitinde karşılıklı ölçerlerin yerleşimi, (c) model boru ve uç bağlantı elemanlarının deney kutusu içerisindeki yerleşimi

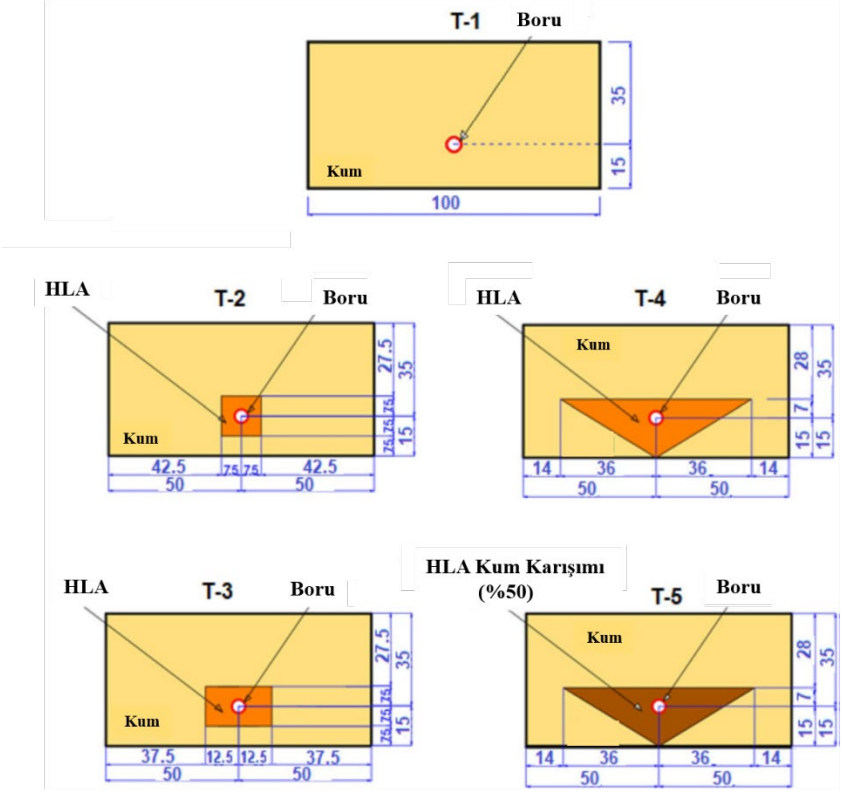
Bağlantı elemanları, farklı silikon ve yapıştırıcı karışımları üzerinde gerçekleştirilen çekme ve basınç deneyleri sonucunda yaklaşık elastik davranış gösterecek şekilde geliştirilmiştir. Şekil 3c'de model borunun deney kutusu içerisindeki konumu ile her iki ucunda kullanılan bağlantı elemanları görülmektedir. Uç bağlantı elemanları, borunun deney kutusu dışında devam eden ankrajsız bölümündeki eksenel zemin-boru etkileşimini temsil edecek şekilde tasarlanmıştır. Kuvvet-yer değiştirme ilişkisi, geliştirilen bağlantı elemanının yaklaşık doğrusal elastik davranışını göstermektedir. Bağlantı elemanlarının dönme rijitliği ihmal edilebilir düzeyde olduğundan, bu elemanlar temel olarak boru uçlarında eksenel sürekliliğin sağlanması amacıyla kullanılmıştır. Borunun faydan uzakta kalan kısımları yaklaşık doğrusal davranış gösterirken, fay çevresinde yüksek eğriliklerin meydana geldiği bir bölge oluşmaktadır. Bu bölgenin toplam uzunluğu $2xL_c$ olarak tanımlanmaktadır. Sınır koşullarının borunun genel eğilme davranışını etkilememesi için toplam yüksek eğrilik bölgesi uzunluğunun ($2xL_c$), deney düzeneğinin toplam uzunluğundan daha küçük olması gerekmektedir. Eğriliğe bağlı yanal yer değiştirmenin geliştiği uzunluk (L_c); fay yer değiştirmesi (δ), birim boru uzunluğu başına en büyük yanal zemin direnci (P_u) ve borunun eğilme rijitliğinin (EI) bir fonksiyonudur (Sarvanis ve Karamanos, 2017). Model deneyleri için $2xL_c$ değerleri Sarvanis ve Karamanos (2017) tarafından önerilen analitik yöntem kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen değerlerin deney düzeneğinin toplam uzunluğundan küçük olduğu belirlenmiştir. Böylece sınır koşullarının borunun genel eğilme davranışı üzerindeki etkisinin sınırlandırıldığı kabul edilmiştir. İlgili hesaplamaların ayrıntıları Demirci (2020)'de ve Karaman vd (2022)'de verilmiştir. HLA kullanımının doğrultu atımlı fayları kesen gömülü boru hatlarının davranışı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla toplam beş fiziksel model deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney programı Tablo 1'de verilmiştir. Tüm deneylerde boru çapı (D), boru et kalınlığı (t), gömülme derinliği (H), fay kesişme açısı (β) ve en büyük fay yer değiştirmesi (δ) sabit tutulmuş; HLA oranı ile HLA dolgu hendeğinin geometrisi değiştirilmiştir.

Tablo 1. HLA dolgu kullanımının etkisinin araştırılmasına yönelik model deney programı

Deney No	**Boru çapı, D (cm)** (m)	**Boru et kalınlığı, t (cm)**	**Gömülme derinliği, H (cm)**	**Fay kesişme açısı, β (°)**	**Fay yer değiştirmesi, δ (cm)**	**HLA oranı (%)**	**Hendek geometrisi**
T-1	5	0,3	35	90	30	0	--
T-2	5	0,3	35	90	30	100	Kare
T-3	5	0,3	35	90	30	100	Dikdörtgen
T-4	5	0,3	35	90	30	100	Üçgen
T-5	5	0,3	35	90	30	50	Üçgen

Bu çalışmada, HLA kullanımının doğrultu atımlı fay hareketine maruz gömülü boru hatlarının davranışı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla beş farklı fiziksel model deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney programı Tablo 1'de verilmiş ve deneyler T-1, T-2, T-3, T-4 ve T-5 olarak adlandırılmıştır. Tüm deneylerde 5 cm dış çapa (D) ve 0,3 cm et kalınlığına (t) sahip aynı özellikteki HDPE borular kullanılmıştır. Borular 35 cm gömülme derinliğinde (H) yerleştirilmiş ve fay izini 90°'lik kesişme açısıyla (β) geçecek şekilde konumlandırılmıştır. Böylece deneyler arasında boru geometrisi, gömülme derinliği ve fay kesişme açısı sabit tutularak HLA dolgusunun etkisinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Model deneylerinde uygulanan en büyük fay yer değiştirmesi (δ) 30 cm olup, bu değer $\delta/D = 6,0$ oranına karşılık gelmektedir. Literatürde incelenen vaka örneklerinde δ/D oranının 6 düzeyine kadar ulaşabildiği belirtilmektedir (Demirci vd., 2018, 2021). Ayrıca bu çalışmada, gömülü HDPE boruların büyük fay yer değiştirmeleri altındaki asimptotik davranışının gözlenmesi amaçlandığından yüksek δ/D değerlerinin incelenmesi tercih

edilmiştir. Şekil 4'de, her bir deney için hendek konfigürasyonlarının şematik görünümü ve boyutları verilmiştir.



Şekil 4. Model deneylerinde kullanılan hendek koşullarının şematik gösterimi: HLA içeriği, hendek geometrileri ve boyutları (boyutlar cm cinsindendir).

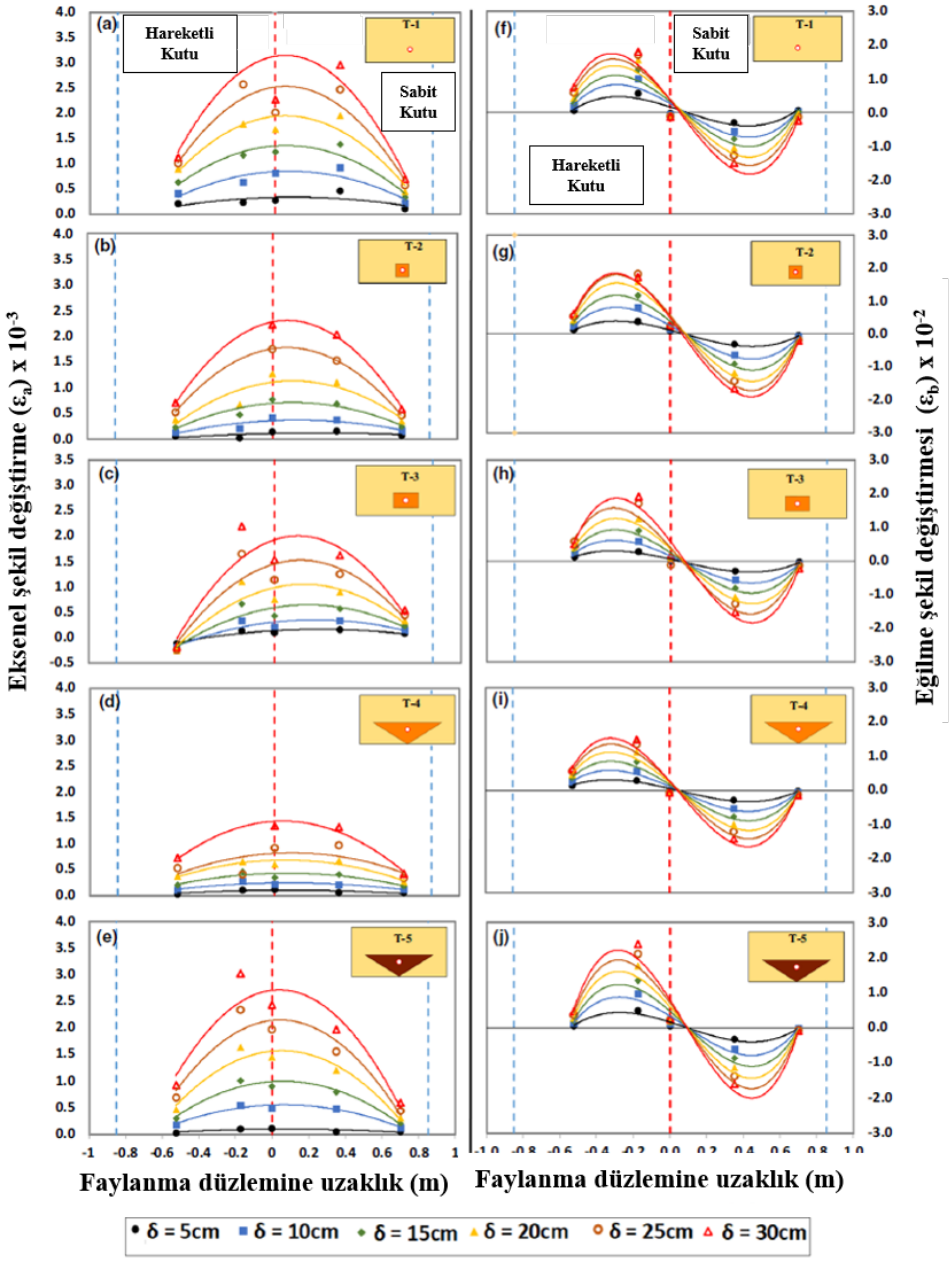
Tüm deneylerde Red Hill 110 kumu, yaklaşık 20 cm'lik sabit düşme yüksekliği korunarak yağmurlama yöntemiyle deney kutusuna yerleştirilmiştir. T-2 ve T-3 deneylerinde kare ve dikdörtgen HLA bölgelerinin geometrisini oluşturabilmek amacıyla özel olarak imal edilmiş bir hendek çerçevesinden yararlanılmıştır (Demirci vd., 2018, 2021).

3. MODEL DENEY SONUÇLARI

3.1. Model Deneylerinde Eksenel ve Eğilme Şekil Değiştirmelerinin Dağılımı

Model boruların farklı konumlarında, borunun karşılıklı iki yan yüzeyine toplam beş çift birim şekil değiştirme ölçer yerleştirilmiştir. Bu ölçüm noktalarından elde edilen birim şekil değiştirme verileri ile boruların yer değiştirme profilleri birlikte değerlendirildiğinde, doğrultu atımlı fay hareketi altında model borularda çift eğrilikli eğilme davranışının geliştiği belirlenmiştir. Ölçüm noktalarından elde edilen verilere polinom eğilim eğrileri çizdirilmiş ve en büyük eğilme şekil değiştirmeleri bu eğriler kullanılarak belirlenmiştir. T-1, T-2, T-3, T-4 ve T-5 deneyleri için farklı normalize fay yer değiştirmelerinde (δ/D = 1,0–6,0) boru boyunca oluşan eksenel şekil değiştirme (ε_a) ve eğilme şekil değiştirmesi (ε_b) dağılımları Şekil 5'de verilmiştir. Şekillerde mavi kesikli çizgiler model borunun uçlarını, kırmızı kesikli çizgi ise fay izini göstermektedir. Fay izinin sol tarafı hareketli kutuyu, sağ tarafı ise sabit kutuyu temsil etmektedir. Şekil 5a–e'de T-1–T-5 deneyleri için eksenel şekil değiştirme dağılımları, Şekil 5f–j'de ise aynı deneylere ait eğilme şekil değiştirmesi

dağılımları sunulmuştur. Şekillerdeki eğriler, model borular boyunca ölçülen eksenel ve eğilme şekil değiştirmelerine elde edilen eğilim eğrilerini göstermektedir. Deney sonuçları, hemen hemen tüm konfigürasyonlarda en büyük eksenel şekil değiştirmelerin fay izinin yakın çevresinde geliştiğini ve faydan uzaklaştıkça azaldığını göstermektedir. 25 cm fay yer değiştirmesinde (δ/D = 5,0) T-1, T-2, T-3, T-4 ve T-5 deneylerinde elde edilen en büyük eksenel şekil değiştirmeler sırasıyla %0,26, %0,18, %0,16, %0,097 ve %0,23 olarak belirlenmiştir. Tüm model deneylerinde fayın bir tarafında içbükey, diğer tarafında dışbükey olmak üzere yaklaşık simetrik çift eğrilikli bir boru deformasyonu meydana gelmiştir. Eğilme şekil değiştirmeleri fay izi civarında yaklaşık sıfır değerine ulaşmaktadır. δ/D = 5,0 için T-1, T-2, T-3, T-4 ve T-5 deneylerinde belirlenen en büyük eğilme şekil değiştirmeleri sırasıyla %1,8, %1,8, %1,6, %1,4 ve %2,1'dir.



Şekil 5. Farklı normalize fay yer değiştirmelerinde (δ/D) T-1, T-2, T-3, T-4 ve T-5 deneyleri için boru boyunca (a–e) eksenel şekil değiştirme ve (f–j) eğilme şekil değiştirmesi dağılımları

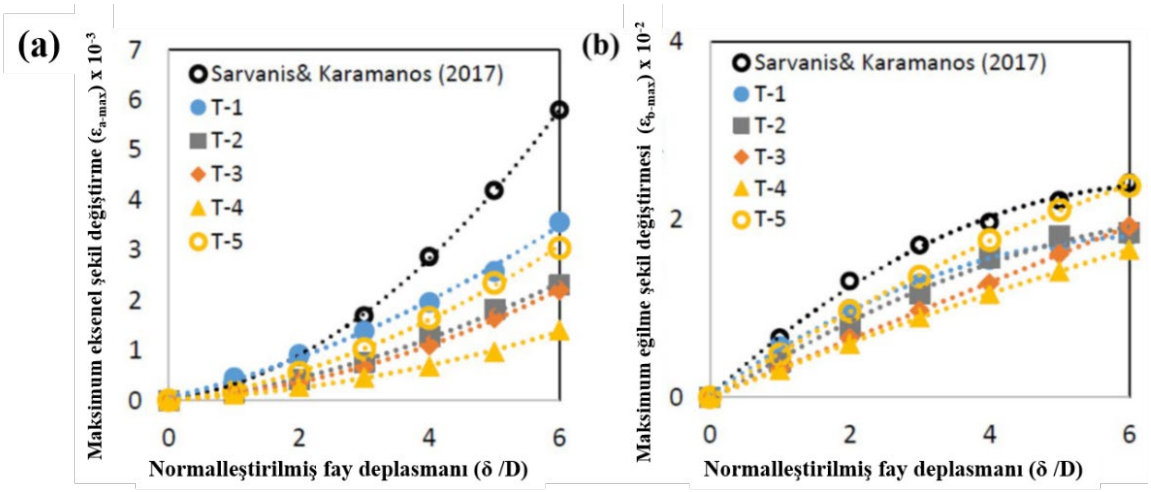
Bu sonuçlar, hendek dolgusundaki HLA oranının yanı sıra hendek geometrisi ve boyutlarının da doğrultu atımlı fayları kesen sürekli gömülü boruların davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Şekil 5'de görüldüğü üzere eksenel şekil değiştirmeler yaklaşık 10^{-3}, eğilme şekil değiştirmeleri ise yaklaşık 10^{-2} mertebesindedir. Büyüklükler karşılaştırıldığında, model boruların davranışının belirgin biçimde eğilme etkisinin baskın olduğu bir davranış sergilediği görülmektedir. Bu durum, doğrultu atımlı fayları 90° açıyla kesen gömülü boru hatları için literatürde bildirilen deneysel ve sayısal sonuçlarla uyumludur (Ha vd., 2008; Saiyar vd., 2016; Ni vd., 2018a,b,c).

3.2. HLA İçeriği ve Hendek Geometrisinin Boru Davranışına Etkisi

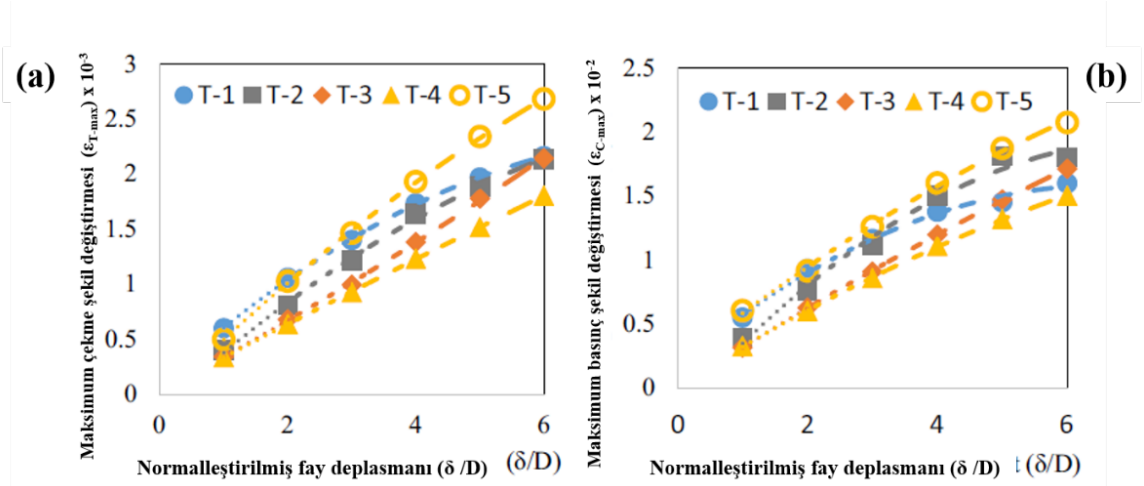
Farklı normalize fay yer değiştirmelerinde (δ/D) elde edilen en büyük eksenel ve eğilme şekil değiştirmeleri Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6a'ya göre, en düşük eksenel şekil değiştirmeler genel olarak boru çevresinin üçgen hendek içerisinde %100 HLA ile doldurulduğu T-4 deneyinde elde edilmiştir. T-4 ve T-5 sonuçlarının karşılaştırılması, HLA oranının artmasının eksenel şekil değiştirmeleri azalttığını göstermektedir. T-2, T-3 ve T-4 deneyleri arasındaki farklılıklar ise hendek geometrisi ve boyutlarının boru davranışı üzerinde önemli etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. En büyük eğilme şekil değiştirmeleri için de en düşük değerler T-4 deneyinde elde edilirken, en yüksek değerler T-5 deneyinde gözlenmiştir (Şekil 6b). T-4 ve T-5'in karşılaştırılması, HLA oranının eğilme davranışını önemli ölçüde etkilediğini; T-2 ve T-3 sonuçları ise hendek genişliğinin artırılmasının en büyük eğilme şekil değiştirmelerini azalttığını göstermektedir. T-1 deney sonuçları ayrıca Sarvanis ve Karamanos (2017) tarafından önerilen analitik yöntemle $0 \leq \delta/D \leq 6$ aralığında karşılaştırılmıştır. HLA'nın dayanım parametreleri deneysel olarak belirlenmediğinden analitik çözüm yalnızca T-1 için uygulanmış; yanal zemin direnci $q_{u1} = q_{u2} = 2244$ N/m ve HDPE borunun Young modülü 750 MPa (Ha vd., 2008) alınmıştır. Deneysel ve analitik sonuçların değişim eğilimleri genel olarak uyumlu olmakla birlikte, analitik yöntem artan fay yer değiştirmelerinde şekil değiştirmeleri daha yüksek tahmin etmektedir. Özellikle eksenel şekil değiştirmeler için $\delta \leq 3D$ aralığında uyum yüksekken, $3D \leq \delta \leq 6D$ aralığında fark artmaktadır. Bu durumun deney düzeneğindeki boru uç bağlantılarının eksenel rijitliğinden kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. En büyük eksenel şekil değiştirme ($\varepsilon_{a,max}$), δ/D arttıkça üstel nitelikte artmaktadır. Fay yer değiştirmesiyle borunun ankrajsız uzunluğunun (La) ve buna bağlı eksenel kuvvetlerin artması bu davranışın temel nedenidir. Buna karşılık, en büyük eğilme şekil değiştirmesi ($\varepsilon_{b,max}$) δ/D ile logaritmik nitelikte artmaktadır. Artan fay hareketiyle boru önünde gelişen pasif zemin bölgesinin taşıma kapasitesine ulaşması sonrasında yanal zemin–boru etkileşim basıncındaki artış sınırlanmakta ve eğilme şekil değiştirmelerinin artış hızı azalmaktadır. Her iki davranış da Sarvanis and Karamanos (2017) ve Ha vd. (2008)'in deneysel bulgularıyla uyumludur.

Sim vd. (2012), HLA hendeğinin küçük fay yer değiştirmelerinde ($\delta \leq 1D$) boruda oluşan eğilme momentlerini ve şekil değiştirmelerini azalttığını, ancak $\delta > 1D$ durumunda saf kum ile HLA arasındaki farkın azaldığını belirtmiştir. Bu durum, artan fay hareketiyle kumun HLA bölgesine nüfuz ederek malzemenin hasar azaltıcı etkisini sınırlamasıyla ilişkilendirilmiştir. Benzer bir eğilim bu çalışmada da gözlenmiş; HLA hendeğinin eğilme şekil değiştirmelerini azaltmadaki etkinliği T-2'de yaklaşık $\delta = 3D$, T-3'te ise $\delta = 5D$ düzeyinde oldukça sınırlı hale gelmiştir. Ni vd. (2018a, b, c), hendek boyutlarının artırılmasının daha rijit doğal zemin ile boru arasındaki etkileşimi ve boruya aktarılan yükleri azalttığını, ayrıca HLA dolgulu eğimli hendeklerin doğrultu atımlı faylanma altında boru performansını iyileştirdiğini göstermiştir. Bu bulgular mevcut deneylerle uyumlu

olup, T-2, T-3 ve T-4 sonuçları hendek boyutlarının, özellikle genişliğinin artırılmasının hem eksenel hem de eğilme şekil değiştirmelerini azalttığını göstermektedir. Şekil 7'de farklı δ/D değerlerinde en büyük çekme ve basınç şekil değiştirmeleri verilmiştir. En düşük değerler T-4, en yüksek değerler ise T-5 deneyinde elde edilmiştir. T-3 ve T-4 sonuçları $\delta \leq 3D$ için birbirine yakınken, $3D \leq \delta \leq 6D$ aralığında aralarındaki fark artmaktadır. Çekme ve basınç şekil değiştirmelerinin boru hatlarının performansa dayalı tasarımındaki önemi dikkate alındığında, %100 HLA dolgulu üçgen hendek uygulamasının yerel burkulma ve çekme göçmesi potansiyelini azaltabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 6. (a) En büyük eksenel birim şekil değiştirmelerin normalize fay yer değiştirmesi (δ/D) ile değişimi, (b) en büyük eğilme birim şekil değiştirmelerinin normalize fay yer değiştirmesi (δ/D) ile değişimi.



Şekil 7. (a) En büyük çekme birim şekil değiştirmelerinin ve (b) en büyük basınç birim şekil değiştirmelerinin normalize fay yer değiştirmesi (δ/D) ile değişimi.

4. SONUÇLAR

T-1 referans deneyine göre deneylerde meydana gelen en büyük eksenel ve eğilme şekil değiştirmelerindeki değişimler $\delta/D = 5{,}0$ için karşılaştırılmıştır. En büyük eksenel şekil değiştirmelerde T-2, T-3, T-4 ve T-5 deneyleri için sırasıyla %29, %35, %62 ve %8 azalma

elde edilmiştir. Eğilme şekil değiştirmelerinde ise T-2'de belirgin bir değişim gözlenmezken, T-3 ve T-4'te sırasıyla yaklaşık %8 ve %19 azalma, T-5'te ise yaklaşık %17 artış meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, eksenel ve eğilme davranışı birlikte değerlendirildiğinde en yüksek hasar azaltma performansının %100 HLA dolgulu üçgen hendek kullanılan T-4 konfigürasyonunda elde edildiğini göstermektedir. Sonuç olarak hem eksenel hem de eğilme şekil değiştirmelerinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda, genişletilmiş üçgen hendek içerisinde HLA kullanımının gerçek ölçekli uygulamalar açısından uygun bir hasar azaltma çözümü olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Genel olarak, %100 HLA dolgulu üçgen hendek uygulamasıyla doğrultu atımlı fay hareketi altında en büyük eksenel şekil değiştirmelerin %62'ye kadar azaltılabildiği, eğilme şekil değiştirmelerindeki iyileşmenin ise daha sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Bu nedenle HLA dolgulu hendek uygulaması, temel olarak zemin–boru etkileşimini azaltarak boruya aktarılan deformasyonları sınırlandıran bir hasar azaltma yöntemi olarak değerlendirilebilir. Eğilme şekil değiştirmelerinin daha fazla sınırlandırılması için esnek bağlantılar gibi ilave yöntemlerle birlikte kullanılması düşünülebilir (Melissianos vd., 2016).

5. GELECEK ÇALIŞMALAR

RedHill 110 kumunun ortalama dane boyutu, deneylerde kullanılan HLA'nın ortalama dane boyutundan önemli ölçüde küçüktür (Şekil 1). Bu nedenle gerek numune hazırlığı gerekse fay hareketi sırasında kum danelerinin HLA bölgesindeki boşluklara göç ettiği gözlenmiştir. Kumun HLA bölgesine nüfuz etmesi, dolgunun deformasyon azaltıcı etkisini düşürerek boruda gelişen eksenel ve eğilme şekil değiştirmelerini artırabilmektedir. Bu nedenle HLA dolgusunun geotekstil gibi ayırıcı bir malzemeyle çevrelenmesi, dane göçünü sınırlandırarak hasar azaltma performansını artırabilecek bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca farklı sismotektonik koşullara bağlı olmakla birlikte, yüzey faylanmalarında fay yer değiştirmelerinin çoğu durumda yaklaşık 1–2 m mertebesinde olması nedeniyle, büyük çaplı gerçek boru hatları için $0 \leq \delta/D \leq 2$ aralığındaki sonuçların saha davranışının değerlendirilmesi açısından özellikle önemli olduğu düşünülmektedir. Bu çerçevede mevcut deneysel çalışmanın kapsamının genişletilmesine yönelik araştırmalar yazarlar tarafından sürdürülmektedir. Kum danelerinin HLA bölgesine göçünü sınırlandırmak amacıyla HLA dolgu geometrilerinin geotekstil ürünlerle sarıldığı hibrit hasar azaltma sistemleri üzerinde yeni model deneyler planlanmakta ve bu sistemlerin boru hattı performansına etkileri araştırılmaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu bildirinin temelini oluşturan deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesine sağladıkları katkılardan dolayı SurreyÜniversitesine teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

ASTM D4253-00 (2000) Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table. ASTM International, West Conshohocken,PA

ASTM D4254-00 (2000) Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Bhattacharya, S., Demirci, H.E., Nikitas, G., Prakhya, G.K.V., Lombardi, D., Alexander, N.A., Aleem, M., Amani, S. ve Mylonakis, G. (2021), "Physical Modeling of Interaction Problems

in Geotechnical Engineering", Modeling in Geotechnical Engineering, Academic Press, 205–256.

Demirci, H.E., Bhattacharya, S., Karamitros, D. ve Alexander, N. (2018), "Experimental and Numerical Modelling of Buried Pipelines Crossing Reverse Faults", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 114, 198–214.

Demirci, H.E. (2020), "Experimental and Numerical Modelling of Buried Continuous Pipelines Crossing Active Faults", PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Surrey.

Demirci, H.E., Karaman, M. ve Bhattacharya, S. (2021), "Behaviour of Buried Continuous Pipelines Crossing Strike-Slip Faults: Experimental and Numerical Study", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol 92, 103980.

Ha, D., Abdoun, T.H., O'Rourke, M.J., Symans, M.D., O'Rourke, T.D., Palmer, M.C. ve Stewart, H.E. (2008), "Buried High-Density Polyethylene Pipelines Subjected to Normal and Strike-Slip Faulting—A Centrifuge Investigation", Canadian Geotechnical Journal, Vol 45(12), 1733–1742.

Karaman, M., Demirci, H.E., Bhattacharya, S., ve Ecemis, N., (2022), "Usage of Tyre Derived Aggregates as Backfill Around Buried Pipelines Crossing Strike-Slip Faults; Model Tests", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol 20, 3143–3165.

Melissianos, V.E., Korakitis, G.P., Gantes, C.J. ve Bouckovalas, G.D. (2016), "Numerical Evaluation of the Effectiveness of Flexible Joints in Buried Pipelines Subjected to Strike Slip Fault Rupture", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 90, 395–410.

Ni, P., Moore, I.D. ve Take, W.A. (2018a), "Distributed Fibre Optic Sensing of Strains on Buried Full-Scale PVC Pipelines Crossing a Normal Fault", Géotechnique, Vol 68(1), 1–17.

Ni, P., Qin, X. ve Yi, Y. (2018b), "Use of Tire-Derived Aggregate for Seismic Mitigation of Buried Pipelines Under Strike-Slip Faults", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 115, 495–506.

Ni, P., Qin, X. ve Yi, Y. (2018c), "Numerical Study of Earth Pressures on Rigid Pipes with Tire-Derived Aggregate Inclusions", Geosynthetics International, Vol 25(5).

Saiyar, M., Ni, P., Take, W.A. ve Moore, I.D. (2016), "Response of Pipelines of Differing Flexural Stiffness to Normal Faulting", Géotechnique, Vol 66(4), 275–286.

Sarvanis, G.C. ve Karamanos, S.A. (2017), "Analytical Model for the Strain Analysis of Continuous Buried Pipelines in Geohazard Areas", Engineering Structures, Vol 152, 57–69.

Sim, W.W., Towhata, I. ve Yamada, S. (2012), "One-g Shaking-Table Experiments on Buried Pipelines Crossing a Strike-Slip Fault", Géotechnique, Vol 62, 1067–1079.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
D	Boru dış çapı	q_{u1}, q_{u2}	Boruya etkiyen yanal zemin direnci
D_{50}	Ortalama dane çapı	t	Boru et kalınlığı
D_r	Rölatif sıkılık	β	Boru–fay kesişme açısı
E	Boru malzemesinin Youn(elastisite) modülü	γ_{sand}	Kumun kuru birim hacim ağırlığı
EI	Borunun eğilme rijitliği	γ_{HLA}	HLA'nın birim hacim ağırlığı
e_{max}	En büyük boşluk oranı	δ	Fay yer değiştirmesi
e_{min}	En küçük boşluk oranı	δ/D	Normalize fay yer değiştirmesi
G_s	Zemin danelerinin özgül ağırlığı	ε_a	Eksenel birim şekil değiştirme
H	Boru gömülme derinliği	ε_β	Eğilme birim şekil değiştirmesi
L_a	Borunun ankrajsız uzunluğu	$\varepsilon_{a,max}$	En büyük eksenel birim şekil değiştirme
L^c	Eğriliğe bağlı yer değiştirmenin geliştiği uzunluk	$\varepsilon_{\beta,max}$	En büyük eğilme birim şekil değiştirmesi